دستیابی به مدل مناسب برای شناسایی عیوب مکانیکی موتور تراکتور MF399 از طریق آنالیز روغن مطابق با شرایط کاری

محمد رضا ابراهیم زاده*

سید علی محمد برقعی**

سید احمد طباطبایی فر***

علیرضا مسعودی****

محل انجام پژوهش: شرکت کشت و صنعت میان آب اهواز، شرکت فنی و مهندسی البرزتدبیرکاران، شرکت تراکتورسازی ایران و شرکت‌های موتورسازان و ریخته گری تراکتورسازی ایران

چکیده

استفاده از تکنیک عیب‌یابی مکانیکی موتور از طریق آزمایش‌های آنالیز روغن، صرفه‌جویی‌های اقتصادی و زمانی زیادی را به‌دنبال دارد. از طرفی تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این آزمایش‌ها کلید عیب یابی و شناسایی خرابی‌هاست. ولی برای انجام این تجزیه و تحلیل‌ها و تبدیل داده‌های خام به اطلاعات سودمند نگهداری، به مهارت‌های انسانی نیاز است که اولاً به‌راحتی در دسترس نیستند و ثانیاً تحلیل‌ها توام با خطای احتمالی انسانی خواهند بود. بنابراین استفاده از مدل‌های عیب‌یابی مناسب، مفید و سودمند و چه بسا ضروری به نظر می آید. در تحقیق حاضر، مدل عیب‌یابی مکانیکی موتور تراکتور MF399(پرکینز مدل ۶-۱۰۰۶) در حال کار در کشت و صنعت میان آب اهواز به‌دست آمد که به‌منظور تعریف این مدل چهار دستهٔ اصلی عیوب موتور به شرح زیر شناسایی و مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند:

۱- عیوب مربوط به فرسایش رینگ، پیستون و آستری سیلندر

۲- عیوب مربوط به فرسایش یاتاقان‌های میل لنگ

۳- عیوب مربوط به فرسایش توأم رینگ، پیستون، آستری سیلندر و یاتاقان‌های میل لنگ

۴- عیوب مربوط به فرسایش آستری سیلندر

فرمول‌های رگرسیون چندمتغیره مربوط به هر کدام از دسته عیوب با استفاده از روش‌های ریاضی و آماری به‌دست آمد و توسط آزمون‌های t و F مورد آزمون قرار گرفت. به جز مورد ۴ بقیهٔ موارد با قابلیت اطمینان بالایی مورد تأیید قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: عیب‌یابی، نگهداری و تعمیرات پیش نگر، آنالیز روغن.

---

* دانشجوی دوره دکتری مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی- واحد علوم و تحقیقات

** استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی واحد علوم و تحقیقات تهران

*** دانشیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران

****استادیار گروه مهندسی مکانیک(مراقبت وضعیت) مرکز آموزش عالی جهاد

تاریخ دریافت مقاله ۱۳۸۲/۱۰/۱۴ تاریخ دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۳/۷/۱

Archive of SID

www.SID.ir

مقدمه

کاربران موتورهای دیزل همیشه سعی در کاهش عملیات تعمیری ناشی از خرابی در ماشین‌هایشان داشته‌اند. هزینه‌های بالای ناشی از تعمیرات، تعویض قطعات و نگهداری این موتورها، مهندسین «نگهداری و تعمیرات» را بر آن داشته است که از تکنولوژی‌های جدید استفادهٔ بهینه و مؤثر نمایند(۳).

به علت سودمند بودن تکنولوژی نگهداری و تعمیرات پیش نگر، این روش در بسیاری از صنایع مورد قبول واقع شده است. مراقبت وضعیت مؤثر صنایع را قادر می‌سازد که بدون نیاز به بازدید مستقیم از قطعات به مشکلات و عیوب ماشین‌ها پی ببرند. این عیوب در صورت عدم مرتفع شدن ممکن است خسارت های هنگفتی را متوجه سازمان مربوط کند(۱۴).

در سیستم‌های مکانیکی که اجزا با روغن در تماسند، روش پایش روغن[1]، قابلیت بالایی را در تشخیص عیوب مکانیکی داشته و به عنوان ابزاری مؤثر، امکان بهینه سازی سیستم‌ها و کنترل‌های مختلفی نظیر بررسی روند استهلاک، کیفیت قطعات و مواد و چگونگی انجام تعمیرات را فراهم می سازد(۶). ماشین‌های مکانیکی روی یک لایهٔ بسیار نازک در حد ۱۰ میکرومتر از روغن که تقریباً معادل قطر یک سلول خون است حرکت می‌کنند. از دست رفتن این لایه به معنی خرابی بوده و اطمینان از نگهداری روغن به طور سالم، تمیز و خشک حیاتی است. آنالیز روغن این هدف را به ثمر می‌رساند. علاوه بر این همانند خون در بدن انسان، روغن نیز در ماشین نشان‌دهندهٔ مشخصات سالم بودن ماشین است. آنالیز روغن این مشخصه‌ها را به اطلاعات ارزشمندی تبدیل می‌نماید که در زمینهٔ تصمیم‌گیری، نگهداری و بهره‌برداری به کار می‌روند(۷).

مواردی که از طریق آنالیز روغن می‌توان به آن‌ها پی برد به طور خلاصه عبارتند از: سوخت وارد شده به روغن، مواد و کثافات وارد شده به روغن، ضد یخ موجود در روغن، سایش یاتاقان‌ها و عدم کارایی روغنکاری. از این طریق می‌توان عیوب مختلف نظیر خوردگی، مشکلات یاتاقان‌ها، فرسایش غیر عادی رینگ و پیستون موتورها، فرسایش غیر عادی محورها و دنده‌های گیربکس و پمپ‌های هیدرولیک را مورد شناسایی قرار داد و نسبت به رفع عوامل آن اقدام نمود(۱).

استفاده از تکنیک عیب‌یابی مکانیکی موتور از طریق آزمایش‌های آنالیز روغن، از نظر اقتصادی و زمانی صرفه‌جویی قابل توجهی را بدنبال دارد. علاوه بر این تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این آزمایشات کلید عیب‌یابی و شناسایی خرابی‌هاست. ولی برای انجام این تجزیه و تحلیل‌ها و تبدیل داده های خام به اطلاعات سودمند نگهداری، نیاز به مهارت‌های انسانی است که اولاً به راحتی در دسترس نیستند و ثانیاً تحلیل‌ها توام با خطای احتمالی انسانی خواهند بود. بنابراین استفاده از مدل‌های عیب‌یابی مناسب، مفید و سودمند و چه بسا ضروری به نظر می‌آید(۱۰).

هدف از این تحقیق دستیابی به مدل عیب‌یابی مکانیکی موتور تراکتور MF399 از طریق آزمایش‌های آنالیز روغن مطابق با شرایط کاری کشت و صنعت میان آب اهواز بوده که جهت رسیدن به این مدل نیاز به طی مراحل زیر می‌باشد: ۱ـ مراقبت وضعیت موتور از طریق آزمایش‌های آنالیز روغن، عیب‌یابی و رفع عیب، ۲ـ جمع آوری داده‌ها، ۳ـ تجزیه و تحلیل ۴ـ مدلسازی ۵ ـ آزمون مدل.

1- Oil Monitoring

Archive of SID

www.SID.ir

مروری بر تحقیقات گذشته

السون[1](۱۹۸۲) سیستم‌های پایش سیار[2] را به‌عنوان روشی از نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت دستگاه مطرح کرد. این سیستم‌ها اطلاعات دقیقی از پارامترهای موتور را به‌طور پیوسته فراهم آورده و امکان جایگزین نمودن روش‌های تعمیر و نگهداری به صورت بازرسی‌های مکرر و غیر قابل انعطاف را با یک برنامهٔ نگهداری مطابق شرایط، اقتصادی و کاملاً انعطاف پذیر فراهم می‌نمایند(۸). جنر[3](۱۹۸۵) پایش مواد ریز خارجی[4*] را مورد بررسی و تحلیل قرار داد(۱۱). میچل[5](۱۹۸۶) یک سیستم خودکار نگهداری پیش نگر از طریق مراقبت وضعیت[6] را طرح و مورد ارزیابی قرار داد(۱۴). کلر و سبا[7](۱۹۸۹) از یکدستگاه پایش روغن شامل یک حسگر دی الکتریک، جهت اندازه‌گیری تغییرات ثابت دی الکتریک روغن موتورهای توربینی استفاده نمودند. آن‌ها این نتایج را با نتایج حاصل از آزمایش‌های اکسیداسیون، گرانروی و عدد کلی اسید[8] مقایسه نموده و نتیجه گرفتند در صورتی که تلفات حاصل از تبخیر روغن ناچیز باشد، گرانروی و عدد کلی اسید رابطهٔ معنی‌داری با عدد دی الکتریک روغن دارد(۱۲). هیل و اسمیت[9](۱۹۹۰) مبحث سیستم‌های خبره[10] را در مراقبت وضعیت ماشین‌ها مطرح نمودند(۹). ایلوت و گریفیتس[11](۱۹۹۷) جهت اتوماسیون داده‌های حاصل از سیستم‌های مراقبت وضعیت و تبدیل این داده‌ها به اطلاعات مفید نگهداری در سیستم‌های پمپاژ بریتانیا از شبکه‌های عصبی[12] استفاده نمودند(۱۰).

در سال ۱۹۹۷، نیروی دریایی آمریکا یک سیستم جدید شناسایی و پیش‌بینی عیوب ماشین ها[13] متشکل از سیستم‌های آنالیز روغن و آنالیز ارتعاشات به صورت هشدار دهنده[14] را مورد ارزیابی و مقایسه با سیستم‌های معمول مراقبت وضعیت کشتی‌ها قرار داد. مطابق بررسی‌های انجام شده، این سیستم علاوه بر دقت بالاتر، اولاً شرایط سیستم را در زمان واقعی ارائه می‌دهد و ثانیاً اتلاف زمانی را کاهش می‌دهد(۱۳). در همان سال، نیکرسون، ویلیام و ریچارد[15](۱۹۹۷) سیستم هوشمند پایش سلامت اجزا در عملیات نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت دستگاه را مطرح کردند(۱۴). دگاسپاری[16](۱۹۹۹) گزارشی از سیستم‌های مراقبت وضعیت موجود از طریق آنالیز روغن به روش حسگرهای هشدار دهنده[17] را ارائه نمود. بنا به نظرات وی اندازه‌گیری کیفیت روغن در زمان واقعی با استفاده از سیستم‌های هشدار دهنده باعث کاهش هر چه بیشتر هزینه‌های نگهداری ماشین و تغییر در عملکرد موتور خواهد شد. او در این گزارش سه نوع سیستم هشدار دهنده[18] را معرفی کرد(۶):

۱ـ ***سیستم هشدار دهنده از طریق نصب حسگر بر روی موتور***، این حسگر به گونه‌ای طراحی شده که کهنگی روغن را با کنترل ثابت نارسانایی الکتریکی[19] که با خاصیت اسیدی همبستگی دارد و نشانگر زوال روغن است، اندازه‌گیری می‌کند. این حسگر را می‌توان در محل خروجی فیلتر روغن و یا در سینی روغن نصب نمود.

1- Elson 2- On-wing monitoring systems 3- Jener
4- Debris monitoring

*مواد ریز خارجی(Debris): مواد خارجی موجود در روغن سیستم روغنکاری اعم از مواد حاصل از فرسایش قطعات ماشین، مواد حاصل از تغییرات فیزیکی و شیمیایی روغن از قبیل اکسیداسیون و مواد خارجی از قبیل ضد یخ، سوخت و آب و ...

5- Mitchell 6- An automated condition monitoring/predictive maintenance system
7-Keller & Saba 8-Total Acid Number(TAN) 9- Hill & Smith
10- Expert systems 11-. Ilott & Griffiths 12-Neural networks
13- Machinery Prognostic/Diagnostics System(MPDS) 14- On-board
15- Nickerson, William & Richard 16- Intelligent component health monitoring system
17- DeGaspari 18- On-board sensors 19- Dielectric

Archive of SID

www.SID.ir

۲ـ ***سیستم هشدار دهنده از طریق عادات بهره‌برداری*** که برخلاف روش اول در آن از هیچ نوع حسگر روغن استفاده نمی‌شود، بلکه مدلی ریاضی است که با استفاده از رایانه، نرخ تنزل کیفی روغن را از طریق اطلاعات جمع‌آوری شده توسط سیستم‌های مختلف ماشین به‌دست می‌آورد. این مدل بر اساس میلیون ها کیلومتر تست‌های رانندگی و نتایج آنالیز روغن برای هر موتور خاص به‌دست می‌آید.

۳ـ ***سیستم ترکیبی*** که روشی مرکب از پایش شرایط بهره‌برداری و کاربرد حسگر می‌باشد.

در سال ۲۰۰۰، شرکت سازندهٔ موتورهای دیزلی و گازی پرکینز[1] به استفاده از سیستم های هوشمند الکترونیکی[2] به همراه حسگرها و ترانسدیوسرهای نصب شده در نقاط مهم مربوط به فشار، دما، ارتعاشات، گرانروی، ذرات فرسایشی و رطوبتی و ... بر روی موتورها اقدام نمود تا از این طریق جهت عملیات مورد نیاز نگهداری و تعمیرات به استفاده‌کنندگان هشدارهای لازم را بدهد. برای این منظور موتورها مجهز به یک مدول کنترل الکترونیکی[3] شدند که به طور مستمر اقدامات مورد نیاز در ساعت‌های آینده را نشان می‌داد(۵). همانطور که در سوابق تحقیقات دیده شد، اکثر محققین در این موارد فقط نتایج تحقیقاتشان را به‌طور کلی آورده و هیچ یک روش تحقیق و نتیجهٔ اصلی آن که همان مدل است را ارائه نداده‌اند.

مواد و روش‌ها

تراکتورها و شرایط کاری آن‌ها

برای انجام تحقیق، ۷ تراکتور مدل MF399(شکل ۱) ساخت شرکت تراکتورسازی ایران که در شرکت کشت و صنعت میان آب خوزستان(کیلومتر ۹۰ جادهٔ اهواز-شوش) مشغول کار بودند، انتخاب شدند که ۵ دستگاه از آن‌ها نو بودند. با همکاری شرکت‌های کشت و صنعت میان‌آب، البرز تدبیرکاران، تراکتورسازی ایران، موتورسازان تراکتورسازی ایران، ریخته‌گری و آهنگری تراکتورسازی ایران و راه‌آهن جمهوری اسلامی‌ایران شرایط انجام این تحقیق فراهم گردید.

موتور این تراکتورها، موتور دیزل چهار زمانهٔ شش سیلندر آب خنک پرکینز[4] مدل 6-1006 بود. این تراکتورها در طول سال، حدود شش ماه در حال انجام عملیات بودند که در این شش ماه به‌طور متوسط ۱۰ تا ۱۲ ساعت در روز کار می‌کردند. با استفاده از این تراکتورها عملیات خاکورزی و آماده سازی زمین، داشت و برداشت نیشکر انجام می‌شود(شکل ۱). تراکتورهای مذکور در شرایط کاری سنگین و پر گرد و خاک کار می‌کنند و در صورتی که عملیات آن‌ها به علت خرابی متوقف شود، علاوه بر هزینه‌های تعمیرات به‌دلیل ایجاد وقفه در عملیات زراعی خسارت‌های زیادی را موجب خواهند شد.

نمونه‌گیری از روغن موتور و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه

نمونهٔ روغن گرفته شده از این نظرکه آن روغن باید نمونه و نماینده‌ای از کل روغن ماشین باشد بسیار مهم است؛ زیرا نتایج آنالیز روغن فقط بر اساس آنالیز نمونهٔ تخلیه شده بیان می‌شود. روغن قبل از نمونه‌برداری همیشه باید گرم و مخلوط شده باشد، بنابراین نمونه‌گیری از موتور باید بلافاصله پس از خاموش شدن آن انجام گیرد.

1- Perkins
2- Electronic Intelligence
3- Electronic Control Module(ECM)
4- Perkins

Archive of SID

www.SID.ir

به‌منظور نمونه‌گیری از روش پمپ خلا[1] استفاده شد. پس از اتمام نمونه‌گیری، ظرف نمونه را در داخل کیف‌های مخصوص قرار داده و سپس در بسته‌بندی‌های مناسب نمونه از طریق پست به آزمایشگاه ارسال می‌گردید.

آزمایش‌های انجام شده

نمونه‌های مذکور، پس از بسته‌بندی به آزمایشگاه منتقل شده و پس از انجام آزمایش‌های زیر و حصول نتیجه و بررسی کارشناسی، برگهٔ نتایج آزمایش نمونه صادر می‌شد. در صورت غیر مجاز بودن مورد یا موارد نمونه، موتور ذکرشده از نظر نوع خرابی و عیب، مورد بررسی و مطابق شرایط کاری با نتایج آزمایش‌ها مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گرفت که نحوهٔ عمل به طور خلاصه در بخش نتایج و بحث آمده است.

۱- اسپکترومتری جذب اتمی(AAS)Atomic Absorbsion Spectroscopy

آنالیز اسپکترومتریک ذرات در بررسی منشاء ذرات فوق‌العاده مؤثر است. اسپکترومتر بررسی می‌کند که چه عناصر شیمیایی در ذرات وجود دارد، همچنین ممکن است میزان نسبی آن‌ها و احتمالاً نوع ترکیبات شیمیایی موجود در ذرات را بیان کند.

در یک تجزیهٔ جذب اتمی، عنصر مورد اندازه‌گیری باید به حالت عنصری کاهش یافته، تبخیر شده و سر راه دسته شعاع تابش منبع قرار گیرد. این فرایند اغلب اوقات با کشیدن محلولی از نمونه به‌صورت مه رقیق به داخل یک شعلهٔ مناسب، انجام می‌گیرد. یک صافی تک‌رنگ طیف مربوط به هر عنصر مشخص را شناسایی می‌کند. شکل ۲ مجموعه را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد. قسمت اصلی دستگاه شامل منبع نور (لامپ کاتدی)، شعله، مکنده، آینه‌ها، سیستم الکترونیکی، صفحه نمایشگر و صفحه کلیدها برای تنظیم دستگاه است.

به‌منظور آنالیز فلزات توسط دستگاه جذب اتمی، در ابتدا برای هر عنصر لامپ مورد نظر را در دستگاه قرار داده و دستگاه با توجه به طول موج مربوطه تنظیم می‌گردد. نمونه را در اسید(۱+۱) HCl حل کرده که پس از حل شدن، توسط مکنده دستگاه به‌درون شعله افشانده می‌شود و به‌صورت بخار اتمی‌در می‌آید و بر راه دسته تابش منبع قرار می‌گیرد. مقدار نور جذب شده توسط صفحهٔ نمایشگر نشان داده می‌شود که با توجه به‌میزان جذب، غلظت عناصر در مقایسه با غلظت محلول‌های استاندارد محاسبه می‌گردند. برای تولید شعله از اکسنده‌های معمولی شامل هوا، هوای فشرده و گاز اکسید ازت استفاده می‌شود که نوع گاز اکسنده به عنصر مورد نظر بستگی دارد. گاز استیلن هم به‌عنوان سوخت مصرف می‌گردد. رقیق‌کنندهٔ نمونه برای روغن های معدنی متیل ایزوبوتیل کتون است که به نسبت ۰.۳ از روغن ، ۱۰۰ میلی لیتر از رقیق‌کننده می‌باشد(۲).

۲- دستگاه کمیت سنج ذرات((PQ)Particle Quantifier)

دستگاه کمیت سنج ذرات برای نشان دادن ذرات آهنی موجود در روانکار ساخته شده است. اساس کار دستگاه کمیت سنج ذرات که یک مغناطیس سنج است، اندازه‌گیری تغییرات ذرات آهنی در نیروی

1- Vacuum Pump method

Archive of SID

www.SID.ir

مغناطیسی میدان مغناطیسی در اثر مجاورت نمونه روغن می‌باشد. در واقع خطوط میدان مغناطیسی یک کویل که در دستگاه تعبیه شده توسط ذرات آهنی موجود در نمونهٔ روغن دچار انحراف شده و میزان این تغییرات بوسیلهٔ یک سیستم دیجیتال نمایش داده می‌شود. نتایج نشان داده شده توسط دستگاه به‌عنوان ایندکس PQ خوانده می‌شوند و در واقع واحدی ندارند(۲).

۳-تکنیک TDPQ (Time Dependent Particle Quantifire)

این آزمایش توسط دستگاه کمیت سنج ذرات انجام می‌گیرد و در واقع عبارت است از اندازه‌گیری شاخص PQ در زمان‌های متوالی در یک نمونهٔ روغن، بدین ترتیب که بطری حامل نمونهٔ روغن پس از مخلوط شدن روی دستگاه کمیت سنج ذرات قرار گرفته و هر شش ثانیه یکبار نمونه روی میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد و مقدار شاخص PQ ثبت می‌شود. تغییرات شاخص PQ در زمان که در واقع ناشی از ته نشینی ذرات در روغن می‌باشد مبنای تحلیلی است که در نهایت میزان شدت فرسایش را به ما نشان خواهد داد(۲).

۴- گرانروی و شاخص گرانروی Viscosity & Viscosity Index(VI)

مقاومتی که یک روغن نسبت به جاری شدن به‌علت اصطکاک داخلی مولکول‌های آن از خود نشان می‌دهد، گرانروی نامیده می‌شود. گرانروی یک روغن با دمای روغن تغییر پیدا می‌کند.، به‌طوری‌که هر چه درجهٔ حرارت روغن بالاتر رود، گرانروی آن کمتر می‌شود. از این‌رو همواره باید گرانروی همراه با دمایی که گرانروی در آن اندازه‌گیری شده، بیان شود. جهت تعیین گرانروی سینماتیک معمولاً از لوله‌های مویینه که ویسکومتر نامیده می‌شود، استفاده می‌گردد(۱).

۵- مقدار آب (Water Content)

بسیاری از عیوب موتورها به سبب آلودگی روغن با آب یا ضد یخ می‌باشد. با آزمایش‌های معمول آلودگی آب نمی‌توان مقدار آب موجود در روغن موتور را به‌طور صحیح نشان داد، زیرا روغن موتور به قدری داغ است که آب موجود در آن بخار می‌شود؛ بنابراین آنالیز آب بیشتردر سیستم‌های هیدرولیک، گیربکس‌ها و ... استفاده می‌شود. اما با استفاده ازآزمایش اسپکترومتری می‌توان عناصر شیمیایی ضد یخ موجود در روغن را بر حسب جزء در میلیون(ppm) سدیم(Na)، بر(B) و پتاسیم(K) به دست آورد. زمانی‌که مقادیر سدیم، بر و یا پتاسیم در روغن محفظهٔ میل لنگ مشاهده شد، مشخص می‌گردد که آلودگی ضد یخ اتفاق افتاده است(۱).

جمع آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل

پس از انجام آزمایش‌های مذکور بر روی هر نمونه، نتایج آن نمونه وارد کامپیوتر شده و برگهٔ نتایج شامل نتیجهٔ آزمایش‌های مربوط به همان نمونه و سوابق آن همراه با نمودارهای زمانی صادر می‌شد. تعداد ۷ موتور پرکینز 6-1006 به مدت دو سال تحت برنامهٔ آزمایش‌های آنالیز روغن قرار گرفتند که بطور متوسط هر ۷۴ ساعت کارکرد موتور، از آن‌ها نمونه گیری می‌شد. کلاً ۳۱۰ نمونه بررسی گردید و ۳۹ مورد از این

Archive of SID

www.SID.ir

نمونه‌ها که در آن‌ها مقادیر غیرمجاز عناصر، PQ، آب و گرانروی(مطابق تجربهٔ آزمایشگاه) مشاهده شد، مورد بررسی، تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا علت فرسایش‌ها و عیب موتور مشخص گردد که در مواردی به تعمیر موتور منجر می‌گردید. پس از پی بردن به عیوب موتور، هر یک از موارد مربوط به هر عیبی از موتور طبقه‌بندی شده و سپس با استفاده از روش‌های آماری، روابط بین عیوب موتور و نتایج آزمایش‌ها و همچنین قابلیت اطمینان و حدود مجاز عناصر به‌دست آمد.

نتایج و بحث

با بررسی‌های انجام شده روی نتایج طبقه‌بندی شدهٔ آزمایش‌ها و عیب‌یابی‌ها، چهار دستهٔ اصلی عیوب که به دفعات در موتورها رخ داده بودند و به همان دلیل نتایج حاصل از آن‌ها از نظر آماری قابل تجزیه و تحلیل و نتیجه‌گیری بود استخراج گردیدند. این چهار دسته عیوب عبارت بودند از:

الف) عیوب مربوط به فرسایش رینگ، پیستون و آستری سیلندر

ب) عیوب مربوط به فرسایش یاتاقان میل‌لنگ

ج) عیوب مربوط به فرسایش توأم رینگ، پیستون، آستری سیلندر و یاتاقان میل‌لنگ

د) عیوب مربوط به فرسایش آستری سیلندر

ذیلاً موارد فوق به ترتیب مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند:

۱) مدل عیب‌یابی[1] موتور

جهت تشخیص عیب موتور به مدلی نیاز داریم که در صورت مشخص بودن نتایج آزمایش‌های آنالیز روغن نمونهٔ یک موتور، خروجی مدل یکی از چهار دسته عیوب طبقه‌بندی شده باشد. در این بخش از تکنیک آنالیز رگرسیون خطی چندگانه[2] بهره گرفته شده است. البته برخی از متغیرهای مربوط به مدل غیر خطی هستند که برای به‌دست آوردن فرمول‌های رگرسیون بایستی داده‌های غیر خطی به داده‌های خطی تبدیل شوند. برای این منظور لازم است ابتدا جهت اطمینان از خطی بودن روابط بین متغیرها از ماتریس پراکنش[3] داده‌ها و ضرایب همبستگی[4] استفاده کرد. ماتریس پراکنش داده‌های چهار دسته عیب که با استفاده از نرم افزار تحلیل آماری داده‌ها (SPSS) رسم شده در اشکال ۳ تا ۶ نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود به جز تعداد کمی، روابط بین متغیرها یا غیر خطی است و یا رابطهٔ مناسبی بینشان موجود نیست.

جهت دستیابی به روابط خطی، لگاریتم، جذر و توان دو تمام روابط ممکن بررسی گردید که در نتیجهٔ آن مسلم شد روابط ممکن یا خطی و یا لگاریتمی هستند. جهت برآورد ضرایب همبستگی و مقادیر ضرایب رگرسیون از روش کمترین مربعات با کمک نرم افزار SPSS استفاده شد و توسط آزمون‌های دو دامنهٔ F و t ، قابلیت اطمینان آن‌ها به‌دست آمد. نکته‌ای که در تجزیه و تحلیل باید مورد توجه قرار گیرد، در نظر گرفتن فرض مستقل بودن مشاهدات برای رگرسیون چندگانه است. با در نظر گرفتن این فرض تعدادی از متغیرها که مستقل نبوده و با هم رابطه داشته‌اند، از فرمول‌ها حذف شدند؛ زیرا در غیر اینصورت مدل به‌دست آمده توأم با خطا خواهد بود. پس از انجام متوالی مراحل فوق و سعی و خطای بسیار مدل‌های زیر به‌دست آمد.

1- Diagnosis
2-Multiple linear regression analysis
3-Scatter plot matrix
4- Correlation

Archive of SID

www.SID.ir

الف) مدل عیب‌یابی مربوط به فرسایش رینگ، پیستون و آستری سیلندر

با استفاده از ماتریس پراکنش داده‌ها(شکل ۳) و نتایج آزمایش‌ها و انجام مراحل فوق مدل زیر تعریف میشود:

$$PQ = 0.848\,(Fe) - 0.750\,(Si) + 1.74 \times 10^{-2}\left(e^{Cu}\right)$$ فرمول ۱)

به‌طوری‌که PQ : مقدار شاخص کمیت سنج ذرات حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

Fe : مقدار قسمت در میلیون آهن حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

Cu : مقدار قسمت در میلیون مس حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

ارزیابی مدل، جدول تجزیهٔ واریانس و جدول ضرایب رگرسیون پارشیال در جدول ۱ آمده است.

همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مدل به‌دست آمده دارای ضریب تشخیص بالایی است و این ضریب نشان می‌دهد که ۹۸ درصد از پراکندگی مشاهده شده در مقدار PQتوسط سه متغیر Fe، Si و Cu توجیه می‌شود(PQ معیاری از تعداد و اندازهٔ ذرات آهنی است که این ذرات نیز خود همراه سیلیس و مس هستند). این مقدار کاملاً قابل توجه است. R، ضریب همبستگی بین مقدار مشاهده شده متغیر وابسته و مقدار پیش‌بینی شدهٔ آن از روی مدل رگرسیون است. اگر مقدار آن ۱ باشد نشان دهندهٔ آن است که از روی متغیرهای مستقل می‌توان دقیقاً متغیر وابسته را پیش‌بینی کرد. مقدار صفر به این معنی است که متغیرهای مستقل با متغیر وابسته رابطه‌ای ندارند. مقدار مشاهده شدهٔ آن در جدول ۱ که برابر ۰.۹۹ است نشان دهندهٔ آن است که مدل رگرسیون خطی حاضر می‌تواند به خوبی برای پیش‌بینی استفاده شود.

تجزیهٔ واریانس ارائه شده در جدول ۱ چند فرضیهٔ صفر معادل را آزمون می‌کند: اینکه رابطهٔ خطی بین متغیر PQ و متغیرهای Fe، Si و EXPCu وجود ندارد، اینکه تمام ضرایب رگرسیون پارشیال در جامعه برابر با صفر است و اینکه مقدار ضریب تشخیص چندگانه در جامعه برابر با صفر است.

ب) مدل عیب‌یابی مربوط به فرسایش یاتاقان‌های میل لنگ

با استفاده از ماتریس پراکنش داده‌ها(شکل ۴) و نتایج آزمایش‌ها و انجام مراحل گفته شده در قسمت قبل مدل زیر تعریف می‌شود:

$$Ln\,(Cu) = 0.777 + 0.827\;Ln\,(Sn)$$ فرمول ۲)

به‌طوری‌که Cu : مقدار قسمت در میلیون مس حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

Sn : مقدار قسمت در میلیون قلع حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

ارزیابی مدل، جدول تجزیهٔ واریانس و جدول ضریب رگرسیون در جدول ۲ آمده است.

همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مدل به‌دست آمده دارای ضریب تشخیص بالایی است و این ضریب نشان می‌دهد که ۸۲ درصد از پراکندگی مشاهده شده در مقدارLnCu توسط متغیرLnSn توجیه می‌شود. این مقدار کاملاً قابل توجه است. مقدار مشاهده شدهٔ R در جدول ۲ که برابر ۰.۹۰۷ است

Archive of SID

www.SID.ir

نشان دهندهٔ آن است که مدل رگرسیون خطی حاضر می‌تواند به خوبی برای پیش‌بینی استفاده شود.

ج) مدل عیب‌یابی مربوط به فرسایش توأم رینگ، پیستون، آستری سیلندر و یاتاقان‌های میل لنگ

با استفاده از ماتریس پراکنش داده‌ها(شکل ۵) و نتایج آزمایش‌ها و انجام مراحل مذکور مدل زیر تعریف میشود:

$$PQ = -25.679 + 0.5(Fe) + 12.621(Cu)$$ فرمول ۳)

$$LnAl = -0.425 + 0.449(LnCr) + 0.555(LnFe)$$ فرمول ۴)

به‌طوری‌که:

PQ : مقدار شاخص کمیت سنج ذرات حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

Fe : مقدار قسمت در میلیون آهن حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

Cu : مقدار قسمت در میلیون مس حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

Al : مقدار قسمت در میلیون آلومینیم حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

Cr : مقدار قسمت در میلیون کروم حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

ارزیابی مدل، جدول تجزیهٔ واریانس و جدول ضرایب رگرسیون پارشیال در جداول ۳ (مربوط به فرمول ۳) و ۴(مربوط به فرمول ۴) آمده است.

همانطور که در این جداول مشاهده می‌شود، مدل به‌دست آمده دارای ضریب تشخیص بالایی است و به خوبی می‌تواند برای پیش‌بینی استفاده شود.

تجزیهٔ واریانس ارائه شده در جداول ۳ و ۴ چند فرضیهٔ صفر معادل را آزمون می‌کند: اینکه رابطهٔ خطی بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته وجود ندارد، اینکه ضریب رگرسیون در جامعه برابر با صفر است و اینکه مقدار ضریب تشخیص در جامعه برابر با صفر است. با توجه به اینکه مقادیر F بیشتر از سطوح معنی‌دار مشاهده شده ۰.۰۰۰۵ هستند، فرضیه‌های صفر عنوان شده رد می‌شوند.

برای آزمون ضرایب رگرسیون از آزمون t استفاده شده است و همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار این ضرایب کاملاً معنی‌دار هستند. بنابراین با توجه به فرضیات و آزمون‌های مطرح شده می‌توان با قابلیت اطمینان بالایی مدل تعریف شده را پذیرفت.

د) مدل عیب‌یابی مربوط به فرسایش آستری سیلندر

با استفاده از ماتریس پراکنش داده‌ها(شکل ۶) و نتایج آزمایش‌ها و انجام مراحل مذکور مدل زیر تعریف می‌شود:

$$PQ = 14.646 + 6.715(LnSi) + 3.506(Cr)$$ فرمول ۵)

به‌طوری‌که Si : مقدار قسمت در میلیون سیلیس حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

Cr : مقدار قسمت در میلیون کروم حاصل از نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن نمونه

ارزیابی مدل، جدول تجزیهٔ واریانس و جدول ضرایب رگرسیون پارشیال در جدول ۵ آمده است.

Archive of SID

www.SID.ir

همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مدل به‌دست آمده دارای ضریب تشخیص قابل قبولی است و می‌تواند برای پیش‌بینی استفاده شود.

تجزیهٔ واریانس ارائه شده در جدول ۵ چند فرضیهٔ صفر معادل را آزمون می‌کند:

- رابطهٔ خطی بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته وجود ندارد،
- ضریب رگرسیون در جامعه برابر با صفر است و
- مقدار ضریب تشخیص در جامعه برابر با صفر است.

با توجه به اینکه مقدار F بیشتر از سطح معنی‌دار مشاهده شده ۰.۱۴۲ است، فرضیه‌های صفر عنوان شده رد می‌شوند.

برای آزمون ضرایب رگرسیون از آزمون t استفاده شده است و همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار این ضرایب معنی‌دار هستند. نکتهٔ قابل توجه این است که با وجود معنی‌دار بودن آزمون‌های مطرح شده، مقادیر آن‌ها نزدیک به سطوح معنی‌دار بوده و به خوبی سه مدل اول قابل اطمینان نیست. به هر حال با توجه به فرضیات و آزمون‌های مطرح شده می‌توان مدل تعریف شده را پذیرفت.

نتیجه گیری

مدل عیب‌یابی این موتورها از طریق فرمول‌های رگرسیون چند متغیره با روش کمترین مربعات و آزمون‌های F و t به شرح زیر به‌دست آمد:

الف) مدل عیب‌یابی مربوط به فرسایش رینگ، پیستون و آستری سیلندر

$$PQ = 0.848\ (Fe) - 0.750\ (Si) + 1.74 \times 10^{-2}\left(e^{Cu}\right)$$

ب) مدل عیب‌یابی مربوط به فرسایش یاتاقان میل لنگ

$$Ln\ (Cu) = 0.777 + 0.827\ Ln\ (Sn)$$

ج) مدل عیب‌یابی مربوط به فرسایش توأم رینگ، پیستون، آستری سیلندر و یاتاقان میل لنگ

$$PQ = -25.679 + 0.5(Fe) + 12.621\ (Cu)$$

$$LnAl = -0.425 + 0.449(LnCr) + 0.555(LnFe)$$

د) مدل عیب‌یابی مربوط به فرسایش آستری سیلندر

$$PQ = 14.646 + 6.715\ (LnSi) + 3.506\ (Cr)$$

جداول تجزیهٔ واریانس ۱ تا ۵ نشان می‌دهند که بجز عیوب مربوط به آستری سیلندر مدل‌های ارائه شده جهت عیب‌یابی، بقیهٔ موارد با قابلیت اطمینان بالایی مورد تایید هستند و می‌توان جهت عیب‌یابی موتور تراکتورهای MF399 از طریق آزمایش‌های آنالیز روغن با اطمینان از این مدل‌ها بهره جست.

برای استفاده از این مدل، کافی است نتیجهٔ آزمایش آنالیز روغن یک نمونه را با این فرمول ها مطابقت داد و به عیب مربوطه پی برد. واضح است که این مدل فقط برای این مدل خاص اعتبار دارد و برای عیب‌یابی انواع دیگر موتورها توام با خطا خواهد بود.

Archive of SID

www.SID.ir

در پایان از همکاری شرکت‌های کشت و صنعت میان‌آب، البرز تدبیرکاران، تراکتورسازی ایران، موتورسازان تراکتورسازی ایران، ریخته‌گری و آهنگری تراکتورسازی ایران و راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران که شرایط انجام این تحقیق را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی می‌کنم.

منابع و مآخذ

۱- ابراهیم زاده- محمد رضا و برقعی- سید علی محمد. ۱۳۸۱. مونیتورینگ روغن. مجلهٔ مهندسان مکانیک ایران (پرواز). سال یازدهم. شمارهٔ ۲۷. صفحات ۲۰-۱۶.

۲- ابراهیم زاده- محمد رضا و نوری-علیرضا. ۱۳۸۱. سیستم‌های مراقبت وضعیت موتورها از طریق آنالیز روغن و تفسیر نتایج آن‌ها. سومین همایش مدیریت نگهداری در صنعت. دانشکدهٔ صنعت آب و برق شهید عباسپور. اسفند ۸۱.

3- Annon .۱۹۹۱ .Condition monitoring of diesel engines. Noise Vibrat. Worldwide: Vol.22, no.2, pp.27-34.

4- Burgess, T. and Shimbel, L. 1995. What is the prognosis maintenance program. Eng. Min. Journal: Vol.196, no.5, pp32-35.

5- Case, Richard and Todd, Zalud. 2000. Cradle-to-grave product monitoring takes customer service to new levels. Machine Design: Vol.72, Issue 13, p186, 1p.

6- Degaspari, John. 1999. Recording oils vital signs. Mechanical Engineering: Vol.121, Issue5., p.54, 3p,2c.

7- Drew, D. Troyer. 1998. Why oil analysis should be perfomed on-site. Noria Corporation, Oil analysis.com.

8- Elson, B.M. 1982. Flexible maintenance possible with new monitor. AVAIT. Week and Space TECH. Vol.117, no.4, pp.120-128.

9- Hill, J. and Smith, R. 1990. Integrating machinery condition monitoring into maintenance management. World Pumps, pp.25-32.

10- Ilott, P.W. and Griffiths, A.J. 1997. Fault diagnosis of pumping machinery using artificial neural networks. Prog. Inst. Mech. Eng. Part E.J. Process Mech. Eng. Vol.211, no.E3, pp.185-194.

11- Jenner, M. D. 1985. Quantitative debris monitor for lube system diagnostics. IEEE International Automatic Testing Conference. Uniondale. NY(USA): 22-24.

12- Keller, M.A. and Saba, C. S. 1989. Monitoring of ester base lubricants by dielectric constant. Lubr. Eng. Vol.45, no.6, pp.347-354.

13- Martin, D.K. and VanDyke, J. 1997. Integrating vibration current, and wear particle analysis with machine operating state for on-line machinery prognostics/diagnostics system(MPROS). AM SOC Mech. Eng. Tribol. Div. Trib.(Fairfield, NJ, (USA))ASME. Vol.7, pp.61-67.

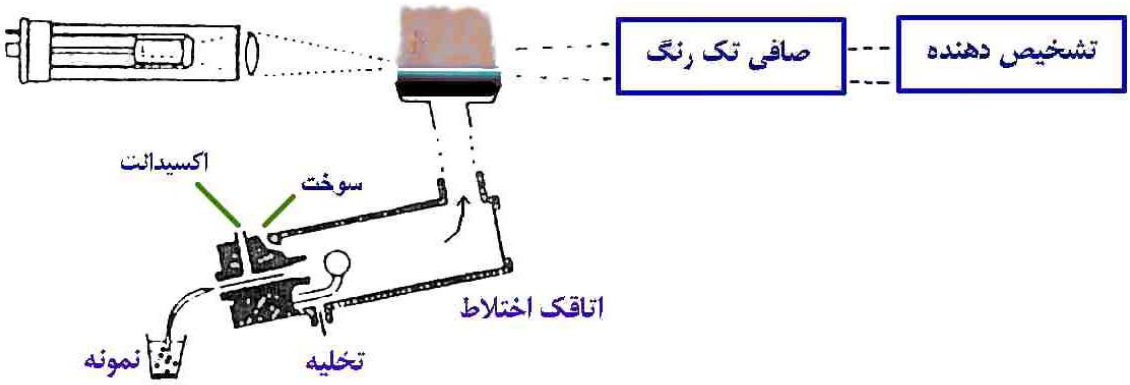
14- Mitchell, J.S. 1986. Predictive maintenance-the promise finally fulfilled for the gas industry. Gas Ind. Vd.30, no.40, p.B.

15- Nickerson, G., Larry William and Richard, W. 1997. Intelligent distributed approach to machinary health assessment. Am. Soc. Mech. Eng. Tribol. Div. Trib.(Fair Field, NJ,(USA)) ASME. Vol.7, pp. 55-60.

Archive of SID

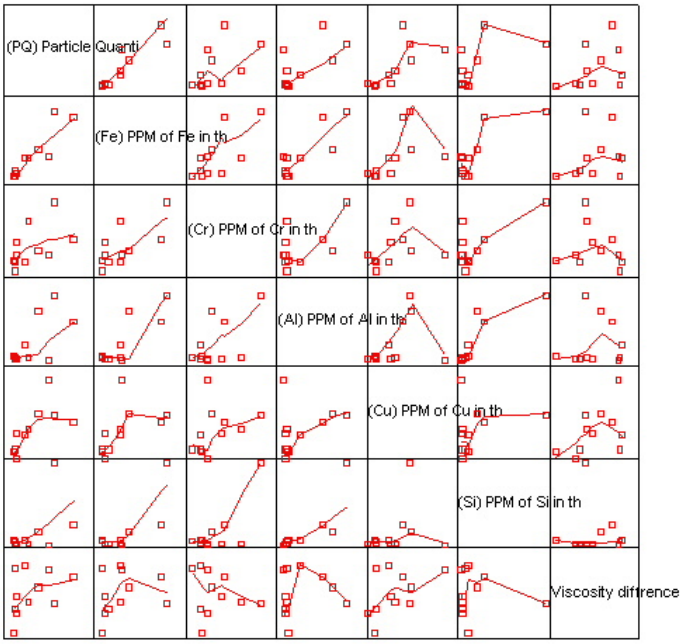
www.SID.ir

شکل ۱- تراکتور MF399 در حال انجام عملیات در فصل برداشت محصول نیشکر، شرکت کشت و صنعت میان آب

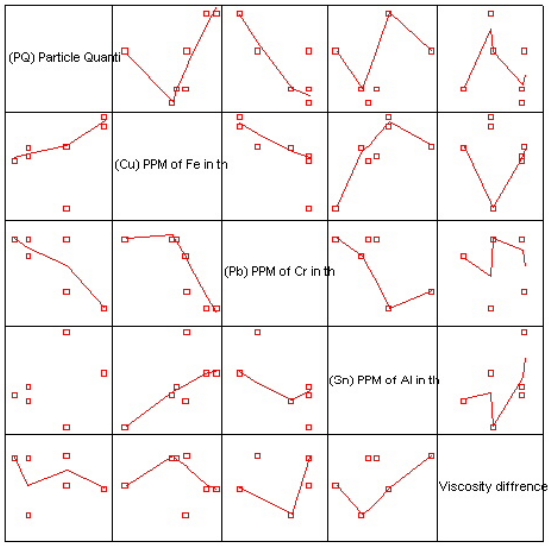


شکل ۲- اسپکتروسکوپی جذب اتمی

www.SID.ir

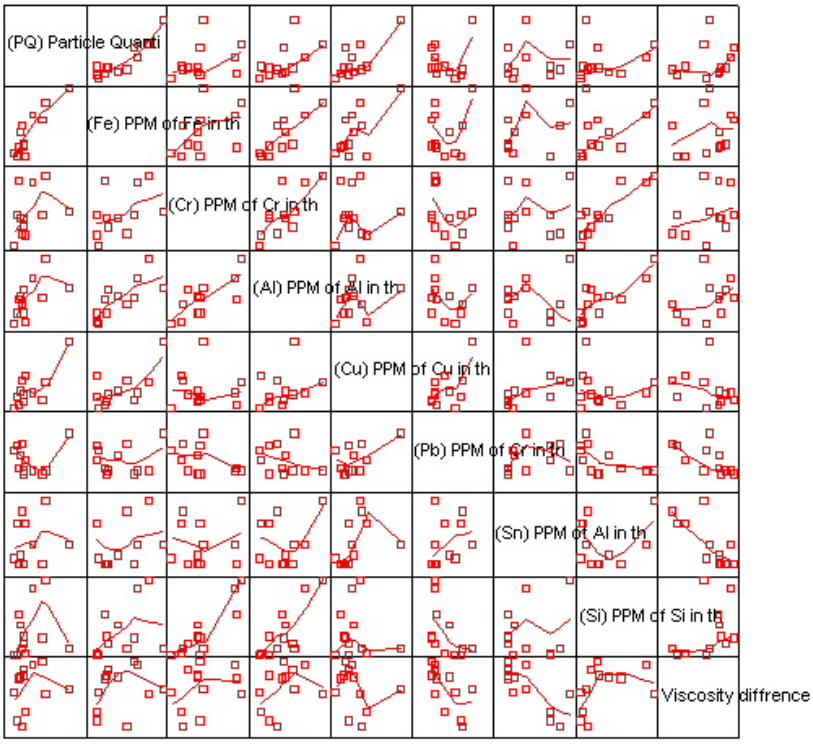


شکل ۳) ماتریس پراکنش داده های عیوب موتور مربوط به فرسایش رینگ، پیستون و آستری سیلندر



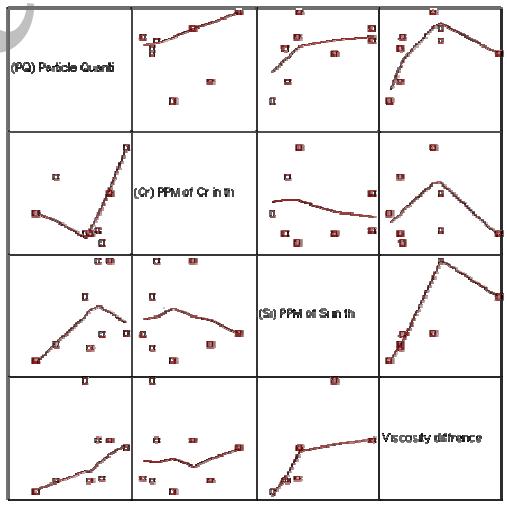
شکل ۴) ماتریس پراکنش داده های عیوب موتور مربوط به فرسایش یاتاقانهای میل لنگ

www.SID.ir



شکل ۵) ماتریس پراکنش داده های عیوب موتور مربوط به فرسایش توأم رینگ، پیستون، آستری سیلندر و یاتاقانهای میلِ لنگ

Archive



شکل ۶) ماتریس پراکنش داده های عیوب موتور مربوط به فرسایش آستریهای سیلندر

www.SID.ir

جدول ۱- نتیجهٔ مدل رگرسیون پارشیال عیوب موتور مربوط به فرسایش رینگ، پیستون و آستری سیلندر، جداول ضریب همبستگی، تجزیهٔ واریانس و ضرایب رگرسیون پارشیال(فرمول ۱)

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تشخیص	متغیرها
۱	۰.۹۹	۰.۹۷	PQ, Fe, Si, EXPCu

جدول تجزیهٔ واریانس

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	درجه معنی‌داری
رگرسیون	۴۷۳۳۴.۳	۳	۱۵۷۷۸.۱	۱۱۴.۸	<۰.۰۰۰۵
باقیمانده	۹۶۱.۹	۷	۱۳۷.۴		
کل	۴۸۲۹۶.۲	۱۰			

ضرایب رگرسیون پارشیال

مدل	ضرایب	t	درجه معنی داری
ثابت	-۰.۴۱	-۰.۰۶۹	۰.۹۴۷
Fe (قسمت در میلیون آهن در نمونه روغن)	۰.۸۵	۱۳.۴۹	<۰.۰۰۰۵
Si (قسمت در میلیون سیلیس در نمونه روغن)	-۰.۷۵	-۴.۴۲	۰.۰۰۳
EXPCu	۰.۰۰۱۷	۴.۰۱	۰.۰۰۵

جدول ۲- نتیجهٔ مدل رگرسیون پارشیال عیوب موتور مربوط به فرسایش رینگ، پیستون و آستری سیلندر، جداول ضریب همبستگی، تجزیهٔ واریانس و ضرایب رگرسیون پارشیال(فرمول ۲)

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تشخیص	متغیرها
۱	۰.۹۱	۰.۸۲	LnCu, LnSn

جدول تجزیهٔ واریانس

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	درجه معنی‌داری
رگرسیون	۲.۵۳	۱	۲.۵۳	۲۳.۱۷	۰.۰۰۵
باقیمانده	۰.۵۵	۵	۰.۱۱		
کل	۳.۰۸	۸			

ضرایب رگرسیون پارشیال

مدل	ضرایب	t	درجه معنی داری
ثابت	۰.۷۸	۴.۵۶	۰.۰۰۶
LnSn	۰.۸۳	۴.۸۱	۰.۰۰۵

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳- نتیجهٔ مدل رگرسیون پارشیال عیوب موتور مربوط به فرسایش توأم رینگ، پیستون، آستری سیلندر و یاتاقانهای میل لنگ، جداول ضریب همبستگی، تجزیهٔ واریانس و ضرایب رگرسیون پارشیال(فرمول ۳)

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تشخیص	متغیرها
۱	۰.۹۳	۰.۸۶	PQ, Fe, Cu

جدول تجزیهٔ واریانس

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	درجه معنی‌داری
رگرسیون	۹۸۸۶۴.۹	۲	۴۹۴۳۲.۴	۲۶.۶	<۰.۰۰۰۵
باقیمانده	۱۶۷۳۰.۱	۹	۱۸۵۸.۹		
کل	۱۱۵۵۹۴.۹	۱۱			

ضرایب رگرسیون پارشیال

مدل	ضرایب	T	درجه معنی‌داری
ثابت	-۲۵.۶۷۹	۰.۸۷	۰.۴۰۵
Fe (قسمت در میلیون آهن در نمونه روغن)	۰.۵۰۰	۳.۹۹	۰.۰۰۳
Cu (قسمت در میلیون مس در نمونه روغن)	۱۲.۶۲۱	۱.۹۴	۰.۰۸۴

جدول ۴) نتیجهٔ مدل رگرسیون پارشیال عیوب موتور مربوط به فرسایش توأم رینگ، پیستون، آستری سیلندر و یاتاقانهای میل لنگ، جداول ضریب همبستگی، تجزیهٔ واریانس و ضرایب رگرسیون پارشیال(فرمول ۴)

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تشخیص	متغیرها
۱	۰.۹۳	۰.۸۷	LnAL,LnCr,LnFe

جدول تجزیهٔ واریانس

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	درجه معنی‌داری
رگرسیون	۴.۳۰	۲	۲.۱۵	۲۸.۷۷	<۰.۰۰۰۵
باقیمانده	۰.۶۷	۹	۰.۰۰۷۵		
کل	۴.۹۷	۱۱			

ضرایب رگرسیون پارشیال

مدل	ضرایب	T	درجه معنی داری
ثابت	-۰.۴۲۵	۰.۶۳۷	۰.۵۴۰
Fe (قسمت در میلیون آهن در نمونه روغن)	۰.۴۴۹	۳.۶۱	۰.۰۰۶
Cu (قسمت در میلیون مس در نمونه روغن)	۰.۵۵۵	۳.۹۵	۰.۰۰۰۳

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۵- نتیجهٔ مدل رگرسیون پارشیال عیوب موتور مربوط به فرسایش آستری سیلندر، جداول ضریب همبستگی، تجزیهٔ واریانس و ضرایب رگرسیون پارشیال (فرمول ۵)

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تشخیص	متغیرها
۱	۰.۶۹	۰.۴۸	PQ, LnSi, Cr

جدول تجزیهٔ واریانس

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	درجه معنی‌داری
رگرسیون	۲۰۵.۹	۲	۱۰۲.۹	۲.۷۶	۰.۱۴۲
باقیمانده	۲۲۴.۱	۶	۳۷.۴		
کل	۴۳۰	۸			

ضرایب رگرسیون پارشیال

مدل	ضرایب	t	درجه معنی‌داری
ثابت	۱۴.۶۴۶	۲.۰۴	۰.۰۸۷
Fe (قسمت در میلیون آهن در نمونه روغن)	۶.۷۱۵	۱.۹۷	۰.۰۹۶
Cu (قسمت در میلیون مس در نمونه روغن)	۳.۵۰۶	۱.۴۷	۰.۱۹۲

Archive of SID

www.SID.ir